

文章编号: 1001-3806(2003)02-0119-03

## IF 钢表面激光熔覆 Co 基合金/SiC<sub>p</sub> 涂层的研究\*

李明喜<sup>1,2</sup> 何宜柱<sup>1</sup> 孙国雄<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>安徽工业大学激光加工研究中心, 马鞍山, 243002) (<sup>2</sup>东南大学机械工程系, 南京, 210018)

**摘要:** 采用 5kW CO<sub>2</sub> 激光器在 IF 钢表面激光熔覆 Co-Cr-W-Ni-Si 合金/SiC<sub>p</sub> 陶瓷涂层。利用光学显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪分析了熔覆层的相结构和凝固组织特征。对熔覆层的耐磨性进行了试验。结果表明, 熔覆层细小均匀, 与基体搭接处为平面、胞状晶, 表层为细密的枝晶。熔覆层的相结构为  $\gamma$ -Co 及 Si<sub>2</sub>W, CoWSi, Cr<sub>3</sub>Si, CoSi<sub>2</sub> 等相。SiC 的加入提高了熔覆层的耐磨性。

**关键词:** IF 钢; 激光熔覆; SiC 陶瓷; 显微组织

**中图分类号:** TG174.44 **文献标识码:** A

## Study of laser clad Co-based alloy/SiC<sub>p</sub> coatings on IF steel

Li Mingxi<sup>1,2</sup>, He Yizhu<sup>1</sup>, Sun Guoxiong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Research Center for Laser Processing, Anhui University of Technology, Maanshan, 243002)

(<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, 210018)

**Abstract:** Coatings, made of Co-Cr-W-Ni-Si alloy+ 20% SiC<sub>p</sub>, deposited by laser cladding on IF steel are introduced. Cross section of such coatings has been examined to reveal their microstructure using optical microscope, scanning electron and XRD. There existed some crystallization morphologies in different regions, such as planar, cellular (at the bonding area), columnar and dendrite (at the center and near the surface). XRD showed that the primary phase  $\gamma$ -Co dendrite and Si<sub>2</sub>W, CoWSi, Cr<sub>3</sub>Si, CoSi<sub>2</sub> existed in the coatings. The results also showed that the wear resistance of the clad layer improved by adding SiC<sub>p</sub>.

**Key words:** IF steel; laser cladding; SiC ceramic; microstructure

### 引 言

激光熔覆是金属表面改性的一种有效手段。激光熔覆具有快速熔化、快速凝固的特点, 可在普通金属材料表面制取高性能的陶瓷增强金属基复合材料等涂层<sup>[1~3]</sup>。Co 基合金为高温抗氧化、抗腐蚀的一种合金, 有关激光熔覆制备陶瓷增强 Co 基复合材料的研究受到了越来越广泛的重视。目前所采用的增强相主要为 WC 等碳化物陶瓷<sup>[4~6]</sup>。SiC 陶瓷是一种强共价键结合的化合物, 具有硬度高、抗氧化性强、耐磨耐蚀性好等特点。国内外关于激光熔覆 SiC 陶瓷增强 Co 基复合材料的研究报道尚少。

IF 钢具有优异的成形性, 广泛应用于汽车、家

电等行业, 但其强度和耐磨性很低, 利用激光表面工程技术在 IF 钢表面制备耐磨、耐蚀涂层, 具有广阔的应用前景。有关在 IF 钢表面激光熔覆 Co 基合金 + SiC 复合材料的研究还未见报道。

笔者采用 5kW CO<sub>2</sub> 激光器在 IF 钢表面激光熔覆 Co 基合金/SiC 陶瓷涂层, 对涂层的组织结构进行分析, 讨论了 SiC 的加入对熔覆层组织、结构、耐磨性的影响。

### 1 试验材料与方法

基体材料为 IF 钢, IF 钢是一种无间隙原子钢, 组织为铁素体, 其硬度低、组织软。将其加工成 50mm×30mm×6mm 的试样, 表面经磨削加工待用。选用钴基合金粉末+ 20% SiC 粉末为预置涂覆材料, SiC 粒度为 325 目, 钴基非自熔性合金粉末粒度为 140 目~325 目, 其化学成分见表 1。

激光熔覆试验在安徽工业大学 TJ-HL-T 5000 型同步送粉式横流 CO<sub>2</sub> 激光加工成套设备上, 加工机床配备六轴四连动西门子数控系统。激光熔

\* 中韩政府间国际合作项目及安徽省科技厅中美国际合作项目。

作者简介: 李明喜, 男, 1966 年 2 月出生。博士研究生。主要从事激光加工的理论及应用研究。

收稿日期: 2002-05-22

覆工艺参数见表2。

Table 1 Nominal composition of powder/wt%

C	W	Ni	Fe	Cr	Si	Co
0.27	4.5	2.27	0.5	28.6	0.9	balance

Table 2 Parameters of laser cladding

laser power $P/W$	scanning speed $v/$ $(mm \cdot s^{-1})$	beam diameter $D/mm$	thickness of preplaced powder/mm	over lapping /%	shielding gas
3000	2.5	4.0	0.8~1.0	40	Ar

横截面金相试样经抛光后用王水深腐蚀;用 OLYMPUS PME-3 型金相显微镜和 PHILIP-XL30 型扫描电镜观察组织及拍照;用 XD-3A 型 X 射线衍射仪分析熔覆层相结构。

在 MM200 环块式滑动磨损试验机上进行磨损试验,对磨试样为 9CrSi, 载荷为 15kg, 转速为 400r/min, 用精度为  $1/10^4$  的分析天平称量、计算失重。

## 2 试验结果

### 2.1 衍射结果

图1为 Co 基合金+20%SiC 的 X 射线衍射图。图中除了具有 fcc 点阵的 Co 基固溶体(即  $\gamma$ -Co) 外,还有  $Si_2W$ ,  $CoWSi$ ,  $Cr_3Si$ ,  $CoSi_2$  等相。

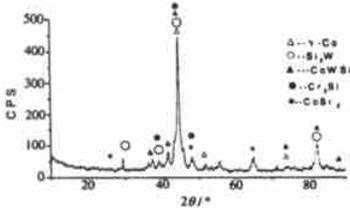


Fig. 1 XRD pattern of the clad

图1为 Co 基合金+20%SiC 的 X 射线衍射图。图中除了具有 fcc 点阵的 Co 基固溶体(即  $\gamma$ -Co) 外,还有  $Si_2W$ ,  $CoWSi$ ,  $Cr_3Si$ ,  $CoSi_2$  等相。

### 2.2 熔覆层的显微组织特征

激光熔覆区由熔覆层、热影响区和基体组成。结合界面处靠近熔覆层为  $10\mu m \sim 15\mu m$  白亮的结合层,显示基体和熔覆层之间形成良好的冶金结合。随着离界面距离的增加,逐步过渡为逆热流方向生长的胞状晶、树枝晶和等轴枝晶;基体为白亮色的铁素体基体,如图2、图3所示。

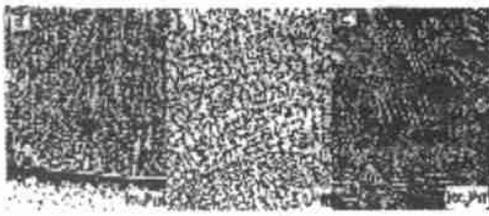


Fig. 2 Optical microstructure of the clad

a- interface (cross section) b- central area of the clad (cross section)  
c- surface

熔池开始凝固时,熔覆层与基体结合界面处存在极大的正温度梯度  $G$ , 而结晶速度  $R$  很小,  $G/R$  比值增大,为低速平界面生长,呈现平面状结晶,如

图2a所示为白亮层。由界面向熔池内部延伸,  $G$  迅速减小,而结晶速度  $R$  逐渐增大,固液平界面失稳,而出现胞晶直至树枝晶<sup>[7]</sup>。熔池的热量通过界面,由基体传出,故该处结晶方向为垂直于界面向熔池中生长。该图还可见,自界面向表面过渡,枝晶逐渐细化。熔覆层表面由于散热的多方向性,即可通过基体,又可通过周围已凝固的熔覆层散热,还可以通过周围空气散热,故表面液体处于深过冷,而出现等轴枝晶,并且结晶方向也呈现多方向性,如图2c。中部为熔覆层的最后凝固区域,冷却结晶速度较慢,晶粒较大,如图2b。

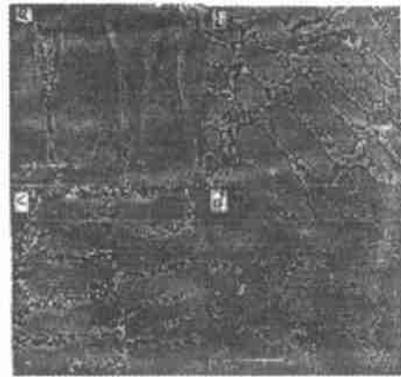


Fig. 3 SEM morphologies of the clad (cross section)

a- cells near the interface b- morphology of the clad near cells  
c- dendrite and eutectic near surface d- morphology of the surface

图3为熔覆层扫描电镜组织。熔覆层组织中初生相为  $\gamma$ -Co 枝晶,枝晶间为共晶,共晶组织的形态多为层片状,片间距为  $0.3\mu m \sim 0.8\mu m$ 。靠近结合界面平面晶向熔池内部生长的为胞状结晶,如图3a,在胞与胞之间可见有细小共晶存在。继续结晶,由于冷却速度加快,而出现树枝晶,如图3b和图3c。此两图相比可见,距离界面越远,树枝晶及共晶越细小。熔覆层表面的枝晶更细小,是由于表层的散热更快,除通过基体散热外,表面也向周围环境散热,液态金属处于过冷度增大,形核率增加,枝晶细化,如图3d。

### 2.3 熔覆层的性能

图4为两种熔覆层耐磨性的对比试验结果,Co+SiC 熔覆层的磨损失重明显低于 Co 基合金熔覆层。该图显现出前者的磨损期失重较多,稳定期失重较少;而后的失重继续增加。

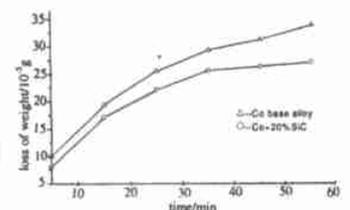


Fig. 4 Wear resistance of the clad layer

### 3 分析与讨论

#### 3.1 SiC 对熔覆层组织和相结构的影响

Co 基合金熔覆层的相结构为  $\gamma$ -Co 和 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub><sup>[8]</sup>。 $\gamma$ -Co 仅在 421 °C 以上稳定存在, 低于此温度即转变为向稳定的 hcp 点阵。室温条件下, 平衡凝固的 Co 基固溶体是 hcp 点阵。由于钴基合金粉末中含有一定量的 Ni, 且 Ni 有稳定 fcc 点阵的作用; 另外, 激光熔覆为快速凝固过程, 高温状态  $\gamma$ -Co 相在快速凝固、冷却过程中来不及发生相的转变, 故在熔覆层中, Co 以面心立方相的  $\gamma$ -Co 固溶体组织存在, 可以推断其中还固溶有 Cr, Ni 和 W 等元素。

本次试验中加入 20% SiC, 而衍射图中没有找到 SiC 的衍射峰, 其原因可能是由于高能密度激光的作用, 使 SiC 颗粒发生分解, SiC 分解的 C, Si 与高温熔池中的合金元素反应生成 Si<sub>2</sub>W, CoWSi, Cr<sub>3</sub>Si, CoSi<sub>2</sub> 等相。

激光作用的熔池其凝固属于快速动态凝固过程, 熔池底部通过基体散热, 相当于快速定向凝固结晶, 晶粒的结晶方向垂直于界面向熔池中生长。随凝固结晶的不断进行, 因多渠道的散热, 导致多方向的结晶。熔池中剩余液体过冷度增大, 高温熔池中形成的上述新相可作为异质形核的核心, 形核率增大, 晶粒细化, 在最后凝固区域出现等轴、准等轴晶。

#### 3.2 SiC 对熔覆层性能的影响

加入 SiC 的熔覆层的耐磨性比 Co 基合金好, 其原因除了熔覆过程中由于高能密度的激光作用, SiC 高温分解后的 Si 和 C 固溶于初生相  $\gamma$ -Co 枝晶中, 增强了对  $\gamma$ -Co 枝晶的固溶强化作用<sup>[9]</sup>; 另外, SiC

的分解也促进了 Si 与 Co, Cr, W 等形成上述细小的化合物。这些化合物弥散分布或者与  $\gamma$ -Co 形成共晶, 使得熔覆层得到强化, 提高了熔覆层的耐磨性。Co 基合金磨损后期失重较大, 是由于熔覆层中强化较弱且熔覆层自表面向下晶粒逐渐增大所致。

### 4 结论

(1) 激光熔覆过程中 SiC 完全熔化解, 与 Co-Cr-W-Ni-Si 合金形成 Si<sub>2</sub>W, CoWSi, CoWSi, Cr<sub>3</sub>Si 金属间化合物及  $\gamma$ -Co 合金固溶体; (2) 熔覆层由结合区、基体及热影响区组成, 由靠近白亮区的平面结晶逐步过渡为胞状晶、树枝晶及等轴枝晶, 且晶粒变细; 结晶方向由界面处垂直于界面逐步过渡为表面的多方向结晶; (3) SiC 的加入提高了熔覆层的耐磨性。

#### 参考文献

- [1] Yue T M, Hu Q W, Mei Z *et al.* Materials Letters, 2001, 47: 165 ~ 170.
- [2] Shepelova L, Medres B, Kaplan W D *et al.* Surface and Coatings Technology, 2000, 125: 45~ 48.
- [3] Wang H M, Chen Y L, Yu L G. Materials Science and Engineering, 2000, A293: 1~ 6.
- [4] Li T J, Lou Q H, Dong J X *et al.* Applied Surface Science, 2001, 172: 331~ 344.
- [5] 杨永强, 田乃良. 中国激光, 1995, A22 (8): 632~ 636.
- [6] Cappelli E, Orlando S, Pinzari F *et al.* Applied Surface Science, 1999, 138~ 139: 376~ 382.
- [7] Kurz W. Fundamentals of solidification. 3rd revised edition. Switzerland: Trans Tech Publication Ltd, 1989.
- [8] Oliveira A S, Silva P S, Vikar R. Surface and Coatings Technology, 2002, 153: 203~ 209.
- [9] 杨永强, 文效忠. 中国激光, 2000, A27(10): 941~ 946.

(上接第 118 页)

性晶体质量的改进以及新型非线性晶体的研制等方面的迅猛发展, 使得纳秒 OPO 作为一种实用化的宽带可调谐光源成为可能, 纳秒 OPO 的研究重新得到人们的极大关注。国际上各大激光公司已陆续推出了许多成型的 OPO 商用产品, 其波长范围从可见到近、中红外连续可调。应该说, 当前纳秒 OPO 的研究工作远没有停止, 相信随着研究的不断深入, 纳秒 OPO 的更多特点与用途也将逐渐被发掘出来, 其输出光束质量也必将会有更大幅度的提高。

#### 参 考 文 献

- [1] Giordmaine J A, Miller R C. Phys Rev Lett, 1965, 14: 973.
- [2] 秦莉娟, 周志尧, 包学诚. 现代科学仪器, 2000(1): 31.

- [3] Lowenthal D D, Bothell A C. SPIE Proc, 2000, 3613: 155.
- [4] 王月珠, 姚宝权, 王 琪. 光学学报, 2000, 20(10): 1368.
- [5] Bapna R C, Dasgupta K, Nair L G. Opt & Laser Technol, 1997, 29(6): 349.
- [6] Tang Y, Cui Y, Dunn M H. Opt Lett, 1992, 17(3): 192.
- [7] Umemura N, Kato K. Appl Opt, 1997, 36(27): 6794.
- [8] Vodopyanov K L. Opt Commun, 1998, 150: 210.
- [9] 黄 骧, 张少军, 王 丽. 激光技术, 2000, 24(4): 252.
- [10] Mes J, Hogervorst W, Tugbaev V. Opt Commun, 2001, 196: 229.
- [11] 王 丽, 杨 建, 黄 骧. 中国激光, 2002, 29(2): 104.
- [12] 王月珠, 姚宝权, 王 琪. 光学学报, 2000, 20(10): 1368.
- [13] Bapna R C, Dasgupta K. Opt & Laser Technol, 2001, 33: 125.
- [14] Anstett G, Goritz G, Kabs D *et al.* Appl Phys, 2001, B72: 583.
- [15] Fix A, Schroder T, Wallenstein R *et al.* J O S A, 1993, B10: 1744.